

УНИКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ СПЛАВОВ Gd-Sc-Al-Co-Ni*

Металлические стекла (аморфные сплавы) привлекают особое внимание в науке и инженерии как функциональные, так как демонстрируют отличные механические и физические свойства, высокую прочность даже при повышенной температуре, высокую коррозионную стойкость, превосходные магнитомягкие свойства.

Разработка экологически чистых технологий – это глобальный тренд современного производства, и магнитное охлаждение – одно из них. Технология магнитного охлаждения, основанная на магнитокалорическом эффекте (МКЭ), используется для получения сверхнизких температур. В последнее время значительные исследования были сосредоточены на магнитном охлаждении при комнатной температуре, которое безопаснее, тише, компактнее и экологичнее, а также имеющее более высокую эффективность охлаждения, чем традиционное охлаждение с компрессией газа [1]. Важной задачей в этой области является поиск новых хладагентов с улучшенными магнитокалорическими характеристиками. Недавние исследования [2] показали, что аморфные сплавы на основе РЗМ, особенно гадолиния, являются привлекательными кандидатами для этих целей, так как обладают превосходным магнитокалорическим эффектом.

Новые сплавы $(\text{Gd}_x\text{Sc}_{1-x})_{60}\text{Al}_{15}(\text{Co}_y\text{Ni}_{1-y})_{25}$ (где x ; $y=0,5$; $0,6$; $0,7$; $0,8$) были изготовлены из чистых металлов дуговой плавкой в атмосфере проточного гелия, методом вакуумной отливки в виде стержня диаметром 3 мм и длиной 50 мм. Структура приготовленных образцов проверена методом рентгеновской дифракции (XRD) при комнатной температуре. Для изучения стеклования в образцах Gd-Sc-Al-Co-Ni- исследована структура как литых, так и закаленных об-

* © Упорова Н.С., Упоров С.А., 2021

разцов. Закаленные стержни диаметром 3 мм и более демонстрируют полностью стекловидную структуру. В случае литых слитков дифракция рентгеновских лучей выявляет широкий ореол с крошечными пиками Брэгга, которые указывают на присутствие небольшого количества кристаллической фазы. По нашим оценкам, процент кристаллитов в слитках составляет менее 5 % для каждого отлитого образца, что говорит о превосходной стеклообразующей способности (GFA).

Проведено сканирование стеклообразных стержней методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в широком диапазоне температур путем измерения теплового сигнала при нагревании и охлаждении. Полученные термические кривые демонстрируют четкое стеклование, за которым следует один или несколько пиков экзотермической кристаллизации, в зависимости от химического состава сплава. По ДСК-кривым определены тепловые параметры стекол.

Магнитные измерения показывают, что выше точек Кюри все образцы являются парамагнетиками. Измеренная намагниченность при приложенном магнитном поле 100 Э показывает, что все стекла представляют собой сверхмягкие ферромагнитные материалы, коэрцитивная сила которых при 4 К не превышает 10 Э. Рассчитанные магнитокалорические параметры для стекол демонстрируют превосходные характеристики, в том числе отличную относительную мощность охлаждения (RCP), которая значительно лучше, чем у стекол на основе Gd с аналогичным химическим составом.

Некоторые магнитные и магнитокалорические характеристики (относительная охлаждающая мощность RCP при приложении магнитного поля 5 Тл, намагниченность насыщения при 4 К M_s , точка Кюри T_C) и тепловые параметры стекол, определенные по ДСК-сканированию со скоростью 10 К/мин: температура стеклования T_g , температура начала кристаллизации T_x , температура плавления T_m , область переохлажденной жидкости $\Delta T_x = T_g - T_x$, в сравнении с характеристиками сплава [3], представлены в табл. 1.

Можно заключить, что исследованные объемно-аморфные сплавы Gd-Sc-Al-Co-Ni являются не менее эффективными хладагентами по сравнению с аналогичными системами стекол, однако, новые металлические стекла демонстрируют улучшенную стеклообразующую способность.

Таблица 1

Магнитокалорические характеристики и тепловые параметры аморфных сплавов, D_c - максимальная получаемая нами толщина образцов

Состав	RCP, Дж/кг	M_s , эме/ г	T_c , К	T_g , К	T_x , К	T_m , К	ΔT_x , К	D_c , мм
Gd ₆₀ Al ₂₅ Co ₁₅ [3]	900	-	105	586	638	953	52	3
(Gd _{0.8} Sc _{0.2}) ₆₀ Al ₁₅ (Co _{0.8} Ni _{0.2}) ₂₅	747	173	93	588	613	919	25	>7
(Gd _{0.7} Sc _{0.3}) ₆₀ Al ₁₅ (Co _{0.7} Ni _{0.3}) ₂₅	754	169	77	593	627	917	35	>10
(Gd _{0.6} Sc _{0.4}) ₆₀ Al ₁₅ (Co _{0.6} Ni _{0.4}) ₂₅	685	158	58	599	636	917	38	>10
(Gd _{0.5} Sc _{0.5}) ₆₀ Al ₁₅ (Co _{0.5} Ni _{0.5}) ₂₅	470	115	37	583	649	914	66	>10

Список литературы

1. *Pecharsky V.K., Cui J., Johnson D.D.* (Magneto)caloric refrigeration: is there light at the end of the tunnel? // *Phil. Trans. Math. Phys. Eng. Sci.* – 2016. – V. 374 (2074) – Article 20150305, DOI:10.1098/rsta.2015.0305.
2. Improving the refrigeration capacity of Gd-rich wires through Fe-doping / *J. Liu, Q. Wang et al.* // *J. Alloys and Compounds.* – 2017. – V. 711. – P. 71–76. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.03.363. ISSN 0925–8388.
3. *Zhang A., Chen D., Chen Z.* Thermodynamic analysis of Gd–Ni(Co)–Al bulk metallic glasses // *Philos. Mag. Lett.* – 2009. – V. 89. – P. 59–65. DOI: 10.1080/09500830802613139.

Работа выполнена при поддержке темы государственного задания ИГТ УрО РАН 0316-2019-0004.